

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**  
**CURSO DE AGRONOMIA**

**EFICIÊNCIA DE USO DE NITROGÊNIO ( $^{15}\text{N}$ ) PELO MILHO SOB  
EFEITO RESIDUAL DE BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO**

**ÉLLEN GRIZA WICKERT**

**BRASÍLIA, DF**  
**2019**

**ÉLLEN GRIZA WICKERT**

**EFICIÊNCIA DE USO DE NITROGÊNIO ( $^{15}\text{N}$ ) PELO MILHO SOB EFEITO  
RESIDUAL DE BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO**

Monografia apresentada à Faculdade de Agronomia  
e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília,  
como parte das exigências do curso de Graduação  
em Agronomia, para a obtenção do título de  
Engenheira Agrônoma

Orientador: Prof. Dr. Cícero Célio de Figueiredo

**BRASÍLIA, DF**

**2019**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Wickert, Éllen Griza

Eficiência de uso de nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) pelo milho sob efeito residual de biochar de lodo de esgoto/ Éllen Griza Wickert; orientador Cícero Célio de Figueiredo. – Brasília, 2019.  
38 p. : il.

Monografia (Graduação – Agronomia) – Universidade de Brasília, 2019.

1. biocarvão. 2. pirólise. 3. técnica isotópica. 4. eficiência de adubação.  
I. Figueiredo, Cícero Célio de, orient. II. Título.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

WICKERT, E. G. Eficiência de uso de nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) pelo milho sob efeito residual de biochar de lodo de esgoto. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2019, 38 páginas. Monografia.

## CESSÃO DE DIREITOS

Nome do Autor: Éllen Griza Wickert

Título da Monografia de Conclusão de Curso: Eficiência de uso de nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) pelo milho sob efeito residual de biochar de lodo de esgoto.

Grau: 3º                      Ano: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias dessa monografia e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação, e nenhuma parte desse relatório pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

ÉLLEN GRIZA WICKERT

CPF: 104.304.429-98

Rua das Paineiras, lote 2, apartamento 702, Via do Palácio do Sol

Águas Claras, Brasília, Distrito Federal, Brasil

(61) 996937898/ ellengwickert@gmail.com

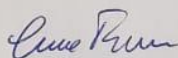
ÉLLEN GRIZA WICKERT

**EFICIÊNCIA DE USO DE NITROGÊNIO ( $^{15}\text{N}$ ) PELO MILHO SOB  
EFEITO RESIDUAL DE BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, como parte das exigências do curso de Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

Aprovado em 01 de JULHO de 2019

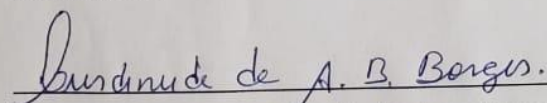
**COMISSÃO EXAMINADORA**



**Professor Doutor. Cícero Célio de Figueiredo**  
Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária –  
Universidade de Brasília  
Orientador



**Doutora Larissa Gomes Araújo Tormen**  
Examinadora



**Doutora Lurdineide de Araújo Barbosa Borges**  
Examinadora

Brasília, julho de 2019

Dedico este trabalho aos meus pais Olavo e Ivete, a minha irmã Anna, e a todos que contribuíram na minha formação.

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço a Deus, pelo dom da vida e por sempre me dar coragem nessa caminhada.*

*À minha família amada, que sempre acreditou na minha capacidade, em especial, a minha mãe Ivete Griza, e ao meu pai Olavo João Wickert, que nunca mediram esforços para me conceder a melhor educação que eu poderia receber, e que hoje, mesmo longe, conseguem me transmitir forças. E a minha irmã Anna Griza Wickert, minha parceira em todos os cantos que andamos nesse Brasil. Agradeço por cada roda de mate onde compartilhamos nossas felicidades e angústias. Amo vocês!*

*Ao meu orientador, Prof. Dr. Cícero Célio de Figueiredo, por confiar esse trabalho a mim e estar disposto a me orientar nessas novas descobertas. Obrigada pelo convívio nesses anos e os ensinamentos repassados.*

*À equipe maravilhosa do Laboratório de Estudos da Matéria Orgânica do Solo, principalmente Alyson Araújo, Arthur Lima, Giovanna Campos, Helen Neves, Jhon Chagas, Jóisman Fachini, Letícia Pereira, Priscila Reis, Stênio Souza, Thais Coser, Thais França e Thamires Dutra que me auxiliaram nas atividades práticas e nos conselhos dados, participando ativamente na construção desse trabalho.*

*À toda equipe de professores e funcionários da Universidade de Brasília, obrigado a todo conhecimento transmitido que contribuíram para a minha formação. Em especial, ao Prof. Dr. José Ricardo Peixoto, que me deu a oportunidade de realizar meu primeiro estágio no início da minha graduação.*

*Aos amigos da Agronomia, Felipe Brondani, pelos mates durante as aulas, Karine Taveira, pelos momentos de companhia e conselhos, e Larissa Martins, pelos momentos de descontração, agradeço por todo o apoio nessa jornada.*

*À amiga que fiz no meu maior desafio da vida, Isabela Martins, que mesmo distante sempre teve paciência para escutar meus desabafos.*

*Às meninas do Instituto Vicenta Maria principalmente, Iara Ferreira, Izabela Baitelo, Lorena Santos e Victória Carvalho, pela rotina diária e pelos momentos de companhia.*

*À minha família do coração, tia Nara e vô Guaracy Lucas que me acolheram como filha no momento que achei que não conseguiria finalizar esse trabalho.*

*Gratidão também à Letícia Lucas pelo convívio diário nos últimos meses, sempre me convidando a dar o melhor de mim.*

*Por fim, a minha segunda casa, o Centro de Tradições Gaúchas Estância Gaúcha do Planalto, que me permitiu viver o tradicionalismo intensamente por 7 anos, e ao meu grupo de dança que me proporciona momentos de distração nos finais de semana, especialmente Adriana Machado, Alice Lauene, Antônio Rosa, Evelin Ramos, Hussein Naser, João Vitor Maser, Mariane Alviene, Rayane Rosback, Veridiane Rosa e Yuri Jerke.*

*Muitíssimo obrigada a todos!*

*“O que transforma qualquer ato em algo extraordinário é o fato de fazermos aquilo com o coração e o que transforma qualquer vida numa existência extraordinária é o fato de ser vivida com amor.”*

*(Mark Sanborn)*



## **RESUMO**

### **Eficiência de uso de nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) pelo milho sob efeito residual de biochar de lodo de esgoto**

O biochar obtido pela pirólise do lodo de esgoto (LE) é uma alternativa para tornar este resíduo útil para uso agrícola. Devido às características físico-químicas e a presença de nitrogênio (N) no biochar de LE, o seu uso pode aumentar a eficiência da adubação nitrogenada nos cultivos. No entanto, ainda há escassez de informação sobre o efeito residual do biochar de LE sobre a eficiência de uso de N pelo milho. O presente estudo teve por objetivo avaliar o efeito residual de biochar de LE obtidos a diferentes temperaturas de pirólise na eficiência do uso de N pelo milho. Para isso foram estudados na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília os seguintes tratamentos de um experimento instalado em blocos ao acaso com três repetições: 1) Adubação mineral com NPK; 2) Biochar produzido a 300 °C e NPK (BC300 + NPK); 3) Biochar produzido a 500 °C e NPK (BC500 + NPK). Foram determinados os teores de N total (NT), N derivado do solo (NDS), N derivado do fertilizante mineral (NDFM) e eficiência de recuperação do fertilizante nitrogenado (ERNF) em grãos e na palhada do milho. O BC500 +NPK proporcionou maior eficiência no uso do fertilizante mineral nitrogenado pelo milho. Entretanto, maiores valores de NT foram obtidos com o BC300 + NPK, por apresentar maior teor de N e ser mais lábil comparado com o BC500. Não houve aumento da produtividade de grãos com o uso do biochar, porém o efeito residual do biochar aumentou a massa da palhada do milho. Portanto, os resultados do presente trabalho indicam que o biochar de LE apresenta efeito residual, de pelo menos dois anos, permitindo melhora na utilização do nitrogênio, reduzindo o uso de fertilizantes minerais pela agricultura.

Palavras-chave: biocarvão, pirólise, técnica isotópica, eficiência de adubação.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
2.1. A técnica do isótopo $^{15}\text{N}$ e a eficiência de recuperação de nitrogênio do fertilizante.....	13
2.2. Biochar: fornecimento de nutrientes e eficiência de uso de nitrogênio pelas plantas .....	14
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>19</b>
3.1. Área e delineamento experimental .....	19
3.2. Obtenção e caracterização do biochar de lodo de esgoto.....	20
3.3. Condução do experimento .....	21
3.4. Época, modo de aplicação do $^{15}\text{N}$ e amostragem do milho .....	22
3.5. Nitrogênio derivado do fertilizante e do solo e a eficiência de recuperação do nitrogênio do fertilizante .....	24
3.6. Análises estatísticas.....	24
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>25</b>
4.1 Eficiência de recuperação de nitrogênio do fertilizante e o nitrogênio derivado do fertilizante e do solo .....	25
4.2 Produtividade de grãos, massa seca e N total.....	28
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>31</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>32</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira contribui fortemente com a economia do país, representando em torno de 25% do Produto Interno Bruto (BRASIL, 2019). Na safra de 2018/19, favorecida pelo clima, a produção de milho deve atingir 97 milhões de toneladas em 17,3 milhões de ha, valor 20,2% maior em comparação com a safra de 2017/18. A produtividade média nacional prevista é de 5,6 t ha<sup>-1</sup> de grãos de milho, e apesar de não possuir a maior produtividade brasileira, a região Centro-Oeste participa de aproximadamente 53% dos rendimentos de milho, se tornando maior produtora pela sua extensão de terras, segundo avaliações da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2019).

Para tais rendimentos, se faz necessário o uso de fertilizantes nitrogenados, sendo de fundamental importância aumentar a eficiência de uso desses fertilizantes. Estimativas da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) indicam que o crescimento da necessidade por fertilizantes até 2020 aumentarão em uma taxa de 1,9% ao ano, quando observado o uso de N essa taxa é de 1,5%, atingindo 118,8 milhões de toneladas em 2020 (FAO, 2017). Em 2018, a quantidade de fertilizantes entregues ao mercado brasileiro ultrapassou 2 milhões de toneladas englobando as fontes de nitrogênio, fósforo e potássio, segundo a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA, 2018).

A dinâmica no solo e o uso de N pelas plantas são dependentes da quantidade de fertilizante nitrogenado aplicada e da mineralização do N de resíduos vegetais, da matéria orgânica do solo e da fixação biológica de nitrogênio (COSER et al., 2016). Devido ao grande número de transformações às quais estão sujeitas o N no sistema solo-planta-atmosfera, diversas estratégias têm sido adotadas para uma maior compreensão da eficiência de uso desse nutriente quando aplicado ao solo como fertilizante. O uso da metodologia do isótopo estável <sup>15</sup>N tem sido empregada com sucesso, possibilitando especificar a origem do N absorvido, se pelo fertilizante ou pelo solo, obtendo assim a eficiência de adubação (FIGUEIREDO et al., 2005; COSER et al., 2016; DING et al., 2019).

Técnicas devem ser aprimoradas a fim de buscar o aumento da eficiência de uso de nutrientes. Nesse sentido, Lehmann et al. (2003) citam duas formas essenciais para reduzir a lixiviação: aplicação de fertilizantes orgânicos, que apresentam liberação lenta, e aumento de locais de adsorção, conservando os fertilizantes minerais já aplicados.

Trabalhos vêm sugerindo a substituição de parte do fertilizante por materiais orgânicos, buscando melhorar a eficiência de uso. Ding et al. (2019) apontaram que a aplicação de 25% de esterco diminuiu perdas de N de fertilizantes minerais solúveis.

Altas taxas de volatilização e lixiviação estão ligadas a grande concentração de  $\text{NH}_3$  pela aplicação direta de fertilizantes nitrogenados solúveis, principalmente os amoniacais. O biochar tem forte afinidade por amônio e nitrato, e ao ser incorporado ao solo apresenta propriedades que torna mais lenta a liberação de N para as plantas (TAGHIZADEH-TOOSI et al., 2012; GONZAGA et al., 2018), reduzindo assim as emissões de formas gasosas de N, principalmente como óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (CASE et al., 2015). Nesse sentido, a aplicação de biochar pode reduzir essas perdas de N do solo. Segundo Feng e Zhu (2017) a combinação da aplicação de fertilizante mineral e biochar deve ser adequada para permitir a redução das emissões de  $\text{N}_2\text{O}$ .

Trabalhos têm mostrado aumento na absorção de N quando há uso de biochars (BC) de diferentes matérias-primas, alguns exemplos são: o BC da palha do milho na cultura do milho (*Zea mays*) (GÜEREÑA et al., 2013), BC de madeira do gênero *Eucalyptus* em uma variedade de gramíneas (MIA et al., 2017), BC de madeira no campo de cevada (*Hordeum vulgare* L.) e girassol (*Helianthus annuus* L.) (HOOD-NOWOTNY et al., 2018), BC da casca de coco e do bagaço de laranja aplicado no cultivo de mostarda indiana (*Brassica juncea* L.) (GONZAGA et al., 2019).

Entre os mecanismos que explicam a maior eficiência de uso de nutrientes, a elevada CTC do biochar é constantemente destacada (SOHI et al., 2009). No caso específico do N, o biochar tem a capacidade de reter N nos solos aumentando a retenção de amônia ( $\text{NH}_3$ ) e amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), reduzir o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e os fluxos de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), melhorar a fixação biológica de N e influenciar benéficamente as

comunidades microbianas do solo (CLOUGH e CONDRON, 2010). As pesquisas de Kastner et al. (2009) indicam também que biochars obtidos em baixa temperatura (400-500°C) apresentam alta área superficial e este material possui grupos funcionais polares e ácidos que são responsáveis pela alta adsorção de  $\text{NH}_3$ , devido sua característica porosa.

A pirólise do lodo de esgoto nas temperaturas de 300 °C e 500 °C, resultando no biochar, é uma alternativa para tornar esse resíduo útil para produção agrícola. Trabalhos no Cerrado brasileiro tem enfatizado o potencial agrônômico desse composto no fornecimento de nutrientes, especialmente P e N (SOUSA e FIGUEIREDO, 2016; FIGUEIREDO et al., 2018; FARIA et al., 2018; FIGUEIREDO et al., 2019). Apesar dos avanços das pesquisas, ainda há carência de informações sobre o efeito residual do biochar de lodo de esgoto sobre a eficiência da adubação nitrogenada em condições de campo.

A fim de investigar se o efeito residual de lodo de esgoto é capaz de melhorar a eficácia da adubação nitrogenada é necessário entender as transformações do N no solo. Para isso, estudos em condições de campo são essenciais para medir a absorção de N pela planta utilizando a técnica isotópica de  $^{15}\text{N}$ , na presença ou não de biochar. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar a eficiência de recuperação do fertilizante nitrogenado pelo milho sob efeito residual de biochar de lodo de esgoto, obtidos em diferentes temperaturas, em solos altamente intemperizados do Cerrado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. A técnica do isótopo $^{15}\text{N}$ e a eficiência de recuperação de nitrogênio do fertilizante

As primeiras pesquisas que pretendiam compreender a destinação de um dos elementos mais complexos nos solos agrícolas, o nitrogênio (N), utilizando o marcador  $^{15}\text{N}$ , foram desenvolvidas no ano de 1940 devido ao surgimento de espectrômetros de massa (CARREIRA et al., 2010). A utilização deste isótopo não traz perigos na manipulação, por ser estável (ALVES et al., 2005), e possibilita observar a quantidade de N que a planta consumiu, que adveio de fertilizante (NDFM) e do solo (NDS), mensurando, assim, a eficiência de recuperação do fertilizante nitrogenado (ERNF) pela planta (COSER et al., 2016).

Com a incorporação de marcador de N no solo é possível a identificação de dois grupos de N: o N inorgânico presente naturalmente no solo, ou por processos de mineralização da matéria orgânica do solo, apresenta abundância similar à natural de 0,3663% de  $^{15}\text{N}$ ; o outro N, que é adicionado ao solo, contém abundância de  $^{15}\text{N}$  bem superior à encontrada na natureza (BARRACLOUGH, 1995). A planta não seleciona o marcado ou o não-marcado para absorver o nutriente, dessa forma o valor de NDFM está relacionado à proporção de  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  e será equivalente a abundância natural de  $^{15}\text{N}$ . O fertilizante marcado inserido no solo é declarado em percentagem de átomos de  $^{15}\text{N}$  em excesso (BARRACLOUGH, 1995; COSER et al., 2016).

Trabalhos determinaram a eficiência de adubação nitrogenada por meio da utilização da técnica isotópica (COELHO et al., 1991; ALMEIDA, 2008; GAVA et al., 2010; TAGHIZADEH-TOOSI et al., 2012; GÜEREÑA et al., 2013; VIEIRA-MEGDA et al., BAI et al., 2015; COSER et al., 2016; CHENG, 2018; DING et al., FIORENTINO et al., 2019). Coelho et al. (1991) demonstraram que há pouca variação na composição isotópica entre as partes da planta de milho, facilitando a amostragem e possíveis interpretações de resultados.

De maneira geral, por meio de técnicas isotópicas, tem sido demonstrado que a ERNF pelas espécies graníferas no mundo é em torno de 54% e que o NDS é cerca 79% do NT (DOURADO-NETO et al. 2010).

## **2.2.Biochar: fornecimento de nutrientes e eficiência de uso de nitrogênio pelas plantas**

O uso excessivo de fertilizantes minerais solúveis tem causado problemas ambientais graves como a poluição das águas e a intensa emissão de gases de efeito estufa (GEE) (BARROW, 2012). A aplicação de N mineral ao longo de anos mostrou redução expressiva na biomassa microbiana e na atividade enzimática do solo devido ao efeito acidificante dos fertilizantes nitrogenados aplicados (LIU et al., 2010), deteriorando a estabilidade do agregado (HAITI et al., 2008) e intensificando a lixiviação de N (LEHMANN et al., 2003). Nesse sentido, o uso de fontes alternativas de nutrientes, mais eficientes, tem sido pesquisado em todos os países do mundo.

A aplicação de adubos orgânicos melhora o crescimento e a produtividade das culturas, gerando mais entradas de resíduos, tanto acima como abaixo do solo, pela produção de palhada e raízes, elevando, assim, em maior amplitude a matéria orgânica do solo (MOS), pois o intenso emprego de materiais nitrogenados solúveis acelera a mineralização da matéria orgânica devido à alta disponibilidade de N no meio, ativando os microrganismos presentes no solo, e consequentemente estimulando a degradação do solo pelo seu efeito acidificante (LIU et al., 2010).

Com a intenção de se obter propriedades semelhantes à Terra Preta da Amazônia brasileira, como altos teores de carbono e nutrientes (GLASER et al., 2000), o biocarvão ou biochar surge como um produto alternativo. Esse resíduo apresenta propriedades como alta estabilidade do carbono, possa ser usado para diminuir a emissão de gases de efeito estufa, além de contribuir para aumentar a produção mundial de alimentos (SOHI et al., 2010).

Biochar é um composto orgânico, obtido pelo aquecimento da biomassa em altas temperaturas, com baixa disponibilidade ou ausência de oxigênio, em processo

conhecido como pirólise. Nesse processo as estruturas aromáticas são formadas, as quais são responsáveis pela estabilidade do material e alta capacidade de adsorção de diversos elementos e compostos (LEHMANN e JOSEPH, 2009). Os biochars são obtidos de diferentes materiais e em diferentes temperaturas, não apresentando propriedades químicas e físicas definidas (LEHMANN e JOSEPH, 2009).

No entanto, o uso de biochar trazem grande estabilidade e longevidade, diminuindo a frequência de aplicação (SOHI et al., 2010). Portanto, tornam-se assim acessíveis para a utilização pelos agricultores e auxiliando a reabilitação de terras degradadas (BARROW, 2012).

É uma tecnologia que apresenta baixas emissões de GEE, maior sequestro de carbono e aumento da retenção de água no solo e pode ser produzido a partir de diversos resíduos agrícolas, domésticos e industriais, diminuindo, assim, a dependência de fertilizantes minerais industrializados (BARROW, 2012).

Os motivos gerais que explicam os benefícios na aplicação do biochar são as relações com grupos microbianos do solo, adsorção de nutrientes, eficiência do uso de nutrientes, modificações físicas e químicas no solo, redução na emissão de  $N_2O$  e  $CH_4$ , estímulo fisiológico das plantas e geração de energia (LEHMANN e JOSEPH, SOHI et al., 2009).

A aplicação de biochar apresenta efeitos em condições de campo, reduzindo a compactação do solo e evitando as perdas de nutrientes por lixiviação. Além disso, carrega propriedades de retenção de umidade favorecendo a disponibilidade dos nutrientes que estão na solução do solo, aumentando a eficiência de utilização pelas plantas, influenciando o crescimento das plantas e sua produtividade (ATKINSON et al., SOHI et al., 2010; ALBUQUERQUE et al., 2013).

Os microrganismos benéficos do solo, aderidos em micro e mesoporos do biochar, aprimoram os processos de nitrificação (O'NEILL et al., 2009), e podem estabilizar e reter os nutrientes da matéria orgânica, e aumentar a capacidade de troca de cátions (CTC). Dessa forma, alteram os processos de ciclagem de nutrientes e disponibilidade de nutrientes na presença do biochar em razão do aumento da área superficial, do aumento da diversidade e da melhora no desempenho desses microrganismos (MIZUTA et al., 2004; LEHMANN e RONDON,



2006; SOHI et al., 2009). Esses sistemas são complexos, e para que sejam notados, necessitam que o composto esteja por um longo período no solo (BARROW, 2012).

O uso do biochar como condicionador, pela sua característica porosa, apresenta vantagens pela retenção de água e os nutrientes que nele estão. Principalmente devido aos processos de aprisionamento físico nos poros finos dos materiais carbonados amorfos e pela produção de carboxilas nos anéis aromáticos do carvão, gerados pela oxidação biológica lenta. Dessa forma, o biochar se torna responsável pela retenção de íons, aumento da CTC, e diminuição na lixiviação de matéria orgânica dissolvida (GLASER et al., 2002).

De maneira geral, o biochar apresenta relação C/N alta por seus altos teores de carbono e baixa concentração de nitrogênio. Essa característica é importante para a retenção de N dissolvido, tanto o oriundo do fertilizante mineral como da matéria orgânica, evitando perdas por volatilização e lixiviação (LEHMANN e RONDON, 2006; STEINER et al., 2007; SOHI et al., 2009). Essa propriedade é fundamental para elevar a eficiência de uso de nutrientes, especialmente o N, pelas plantas.

Nesse sentido, a adição de biochar eleva a adsorção de íons de amônio, pelas cargas presentes no biochar (LEHMANN et al., 2002; SOHI et al., 2009), mitigando, assim, as perdas por lixiviação. O comportamento metabólico e a destinação do N das culturas sob adição de biochar ainda não são bem entendidos.

Considerando as altas doses que normalmente são aplicadas de fertilizantes minerais solúveis, o biochar tem o potencial de fornecer o mesmo rendimento de colheita em baixas taxas de aplicação (SOHI et al., 2009). No caso específico do biochar de lodo de esgoto, foi demonstrado recentemente que a sua aplicação é capaz de substituir fertilizantes minerais solúveis para a produção de milho (FARIA et al., 2018). Em outro estudo, conduzido por Agegnehu et al. (2016) o rendimento de milho em tratamentos com aplicação de biochar por três anos seguidos aumentou até 140% em relação ao controle (sem biochar e sem NPK) com, o que implica um impacto benéfico de longo prazo no rendimento das culturas e na fertilidade do solo.

No estudo de Albuquerque et al. (2013), foi observada uma interação significativa entre a fertilização biochar/mineral na produção de grãos de trigo.

Assim, os maiores rendimentos de grãos foram alcançados conciliando as maiores taxas de aplicação de biochar e fertilização mineral, comparadas ao uso exclusivo da adubação mineral considerada ótima para a cultura, indicando que o biochar tem capacidade de reduzir a necessidade de fertilizantes enquanto o rendimento das culturas é conservado. Da mesma forma, Schulz e Glaser (2012) concluíram que o crescimento das plantas de trigo e a fertilidade do solo apresentaram maiores valores quanto mais biochar foi adicionado após realizarem experimentos em regiões da Austrália.

Chan et al. (2007) estudaram a adição de 100 t/ha de biochar combinado com o uso de fertilizantes minerais teve aumento de rendimentos de até 266% na cultura do rabanete, sugerindo, portanto, que o biochar é apto para aumentar o uso eficiente da adubação nitrogenada pelas plantas, e esse aumento na absorção de N pode ser uma consequência das várias melhorias na qualidade do solo que recebem o biochar, incluindo aumento no pH, carbono orgânico e cátions trocáveis.

A necessidade de fertilizantes por unidade de rendimento pode ser reduzida com uma maior eficiência no uso de fertilizantes e, conseqüentemente, uma menor emissão de óxido nitroso ( $N_2O$ ), ao mesmo tempo diminui o custo de produção de alimentos (VAN ZWIETEN et al., 2010).

De forma mais ampla, os aumentos detectados na eficiência de nutrientes após a aplicação do biochar têm sido principalmente relacionados a uma maior retenção de nutrientes. Essa característica está relacionada ao aumento da CTC, ambiente radicular mais favorável por seu efeito alcalino e diminuição do alumínio disponível, atividades microbianas constantes, efeito de calagem, diminuição da compactação do solo e imobilização de contaminantes (VAN ZWIETEN et al., 2010; ALBUQUERQUE et al., 2013).

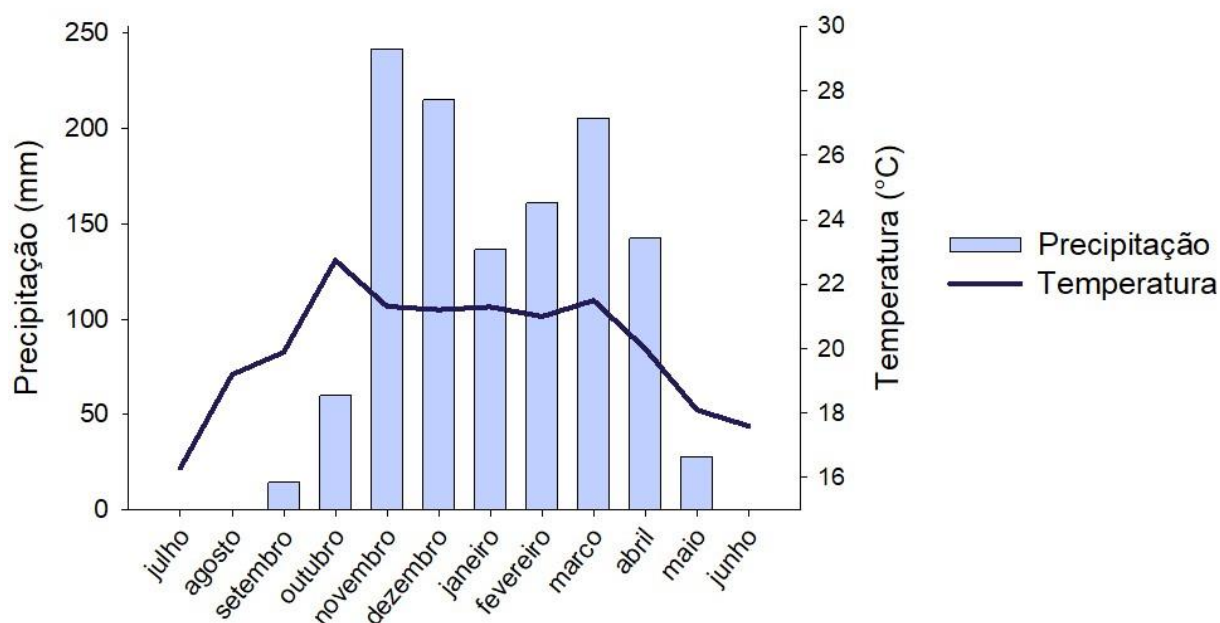
Entre as matérias primas, o lodo de esgoto tem recebido bastante atenção da comunidade científica pelo seu potencial de ser transformado em biochar rico em nutrientes para as plantas. O biochar produzido de lodo de esgoto promove o fornecimento de nutrientes, especialmente fósforo e magnésio, além disso, a melhoria dos indicadores de fertilidade do solo: capacidade de troca de cátions e saturação por base (FARIA et al., 2018).

De acordo com Figueiredo et al. (2018), o biochar de LE também apresenta propriedades distintas conforme a temperatura de pirólise, sendo que aquele produzido a 300 °C (BC300) forneceu maior disponibilidade de nutrientes, como N total, enxofre, cálcio e magnésio, comparado ao biochar produzido a 500 °C (BC500) que apresenta maior teor de matéria orgânica recalcitrante, além de ser alcalino, característica facilitadora do sequestro de carbono e correção de solos tropicais. Além disso, Figueiredo et al. (2019b) mostraram que a utilização de BC300 resultou no aumento na colonização de raízes por fungos micorrízicos, gerando a produção de excreção de proteínas no solo, aumento que foi resultado do incremento da biomassa microbiana do solo. Ao analisar os teores de contaminação do solo por metais pesados, Figueiredo et al. (2019a) concluíram que biochars predominante de águas residuais domésticas não apresenta riscos, podendo, então, ser utilizados na agricultura.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Área e delineamento experimental

O estudo foi conduzido na área experimental da Fazenda Água Limpa, da Universidade de Brasília, localizada no Núcleo Rural Vargem Bonita, Brasília, Distrito Federal (15° 56' 45" S, 47° 55' 43" O, 1095m). O clima da região é classificado como Aw (tropical estacional de savana), segundo classificação de Köppen. A estação chuvosa está compreendida nos períodos de outubro a março e o período seco de abril a setembro, com precipitação média anual de 1500 mm e temperatura variando de 13,2 a 28 °C. As distribuições da temperatura média do ar, da precipitação pluvial mensal entre os meses de julho de 2017 a junho de 2018 estão apresentados na Figura 1.



**Figura 1.** Distribuição da temperatura média do ar e da precipitação pluvial mensal entre os meses de julho/2017 a junho/2018 (Fonte: Estação Agroclimatológica da Fazenda Água Limpa – UnB)

O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico de textura argilosa (EMPRAPA, 2013).

Os doze tratamentos foram ordenados em delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições, as parcelas experimentais apresentavam 20 m<sup>2</sup> (5m x 4m).

Porém os tratamentos estudados foram os seguintes: 1) NPK: adubação mineral com NPK; 2) BC300 + NPK: aplicação de adubação mineral NPK no solo sob efeito residual de biochar obtido a 300 °C e 3) BC500+NPK: aplicação de adubação mineral NPK no solo sob efeito residual de biochar obtido a 500 °C.

### 3.2 Obtenção e caracterização do biochar de lodo de esgoto

Para a produção dos biochars, amostras de Lodo de Esgoto (LE) foram obtidas na Estação de Tratamento de Esgoto da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), na cidade do Gama. As características do LE e dos biochars estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Características químicas e físicas do LE e dos BCs estudados.

Variáveis	LE	BC 300 °C	BC 500 °C
CT (%)	21,0	23,4	19,0
NT (%)	3,0	3,3	2,3
C/N	7,00	7,0	8,3
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	-	17,5	5,84
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	-	431,9	169,3
pH (CaCl <sub>2</sub> )	4,80	6,0	6,5
P (g kg <sup>-1</sup> )	35,70	41,1	61,3
K (g kg <sup>-1</sup> )	0,80	0,16	1,25
Ca (g kg <sup>-1</sup> )	6,6	6,7	7,4
Mg (g kg <sup>-1</sup> )	0,8	1,8	1,7
S (g kg <sup>-1</sup> )	-	15,1	7,4
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )		450	541
B (mg kg <sup>-1</sup> )		9,1	12,05
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	56,37	58,17	80,07
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	114,55	148,22	145,22
Co (mg kg <sup>-1</sup> )	19,63	22,33	25,07

Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	100,28	105,65	136,32
Ni (mg kg <sup>-1</sup> )	57,66	48,66	68,6
Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	206,87	255,53	265,2
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	306,33	321,33	300
AF (g kg <sup>-1</sup> )	-	24,3	4,3
AH (g kg <sup>-1</sup> )	-	19,3	1,1
Humina (g kg <sup>-1</sup> )	-	74,8	95,6
VP (ml/g)	-	0,027	0,053
ASE (m <sup>2</sup> /g)	-	20,17	52,470

AF-ácido fúlvico; AH-ácido húmico; VP-volume de poros; ASE-área de superfície específica; CT-carbono total, NT-nitrogênio total. Limites máximos de metais pesados (mg kg<sup>-1</sup>) aceitos na legislação brasileira: Cr: 1.000; Cu: 1.500; Ni: 420; Pb: 300; Zn: 2.800.

Fontes: Faria et al., 2018; Figueiredo et al., 2018; Resolução CONAMA 375.

O LE foi seco ao ar (aproximadamente 20% de umidade), passado em peneira de malha 8 mm e submetido às temperaturas de 300 e 500 °C em forno de pirólise (Linn Elektro Therm, Eschenfelden, Alemanha), a uma taxa de aumento de 2,5 °C min<sup>-1</sup>, totalizando 120 e 200 min para atingir 300 e 500 °C respectivamente, com um tempo de residência de 30 minutos. Após a pirólise o material foi pesado e armazenado em sacos plásticos.

### 3.3. Condução do experimento

A área experimental foi estabelecida em novembro de 2014 em um campo de pastagem com estágio avançado de degradação. Previamente à instalação do experimento foi aplicada uma dose de calcário de 1240 kg ha<sup>-1</sup> e realizados procedimentos de aração, gradagem e adubação corretiva do fósforo e potássio aplicando-se 1110 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples e 85 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio.

Foram aplicadas e incorporadas ao solo, na camada de 0-20 cm, doses de 15 t ha<sup>-1</sup> (peso seco) de BC300 e BC500 por duas safras consecutivas (2014/2015 e 2015/2016). Para a adubação de manutenção foram utilizados 714 kg ha<sup>-1</sup> de adubo mineral NPK (fórmula 4-14-8) e na adubação de cobertura 150 kg de N ha<sup>-1</sup>, sendo

a ureia a fonte de N, parcelada em duas aplicações, em V4 (quatro folhas desenvolvidas) e em V6 (seis folhas desenvolvidas) em todas as safras, inclusive a estudada (2017/2018), objetivando produtividades de 10 t ha<sup>-1</sup> de grãos segundo recomendações de Sousa e Lobato (2004). Essas dosagens foram utilizadas nas parcelas que apresentavam estes tratamentos.

Foi semeado em dezembro de 2017 o milho híbrido LG 6030 nas 5 linhas da parcela espaçadas em 0,90 m e densidade de seis plantas por metro linear, totalizando aproximadamente 120 plantas por parcela e 66.666 plantas ha<sup>-1</sup>.

Tendo como objetivo estudar o efeito residual, a aplicação do biochar de lodo de esgoto foi suspensa nas safras de 2016/2017 e 2017/2018, permanecendo a aplicação de adubação mineral em todas as safras, nas mesmas épocas de adubação. A Tabela 2 apresenta um resumo das práticas realizadas na área experimental de 2014 a 2018.

**Tabela 2.** Práticas realizadas na área experimental durante os anos de 2014 a 2018.

Safra	Tratamentos	Preparo do Solo <sup>a</sup>	Adubação		
			Corretiva <sup>b</sup>	Manutenção	
				BIOCHAR <sup>c</sup>	NPK <sup>d</sup>
2014/2015	NPK	x	x		x
	BC300 + NPK	x	x	X	x
	BC500 + NPK	x	x	X	x
2015/2016	NPK				x
	BC300 + NPK			X	x
	BC500 + NPK			X	x
2016/2017	NPK				x
	BC300 + NPK				x
	BC500 + NPK				x
2017/2018	NPK				x
	BC300 + NPK				x
	BC500 + NPK				x

SSP: Super fosfato simples. <sup>(a)</sup>: aração, gradagem e 1240 kg ha<sup>-1</sup> calcário; <sup>(b)</sup>: 1110 kg ha<sup>-1</sup> SSP e 85 kg ha<sup>-1</sup> KCl; <sup>(c)</sup>: 15Mg ha<sup>-1</sup> BLE; <sup>(d)</sup>: 714 kg ha<sup>-1</sup> NPK (4-14-8).

### 3.4. Época, modo de aplicação do <sup>15</sup>N e amostragem do milho

Na safra de 2017/2018, foram demarcadas, na área central de cada parcela, duas microparcelsas 0,9 m<sup>2</sup>, totalizando 1,8 m<sup>2</sup>, com o objetivo de avaliar a

recuperação do fertilizante nitrogenado. As microparcels não receberam aplicação do formulado de NPK (4-14-8) e da adubação de ureia em cobertura, apesar disso as doses desses nutrientes foram mantidas utilizando sulfato de amônio marcado com  $^{15}\text{N}$  (0,8% átomo em excesso), cloreto de potássio e superfosfato simples (Tabela 3). No plantio a adubação nitrogenada foi colocada no sulco de semeadura, na adubação de cobertura a fonte de nitrogênio foi colocada na superfície do solo, ao lado da linha de semeadura.

**Tabela 3.** Práticas realizadas na microparcela durante a safra de 2017/2018.

Safra	Tratamentos	Época	Adubação		
			N <sup>b</sup>	P <sup>c</sup>	K <sup>d</sup>
2017/2018	Em todos os tratamentos <sup>a</sup>	Semeadura	30 kg ha <sup>-1</sup>	100 kg ha <sup>-1</sup>	57 kg ha <sup>-1</sup>
		V4	60 kg ha <sup>-1</sup>	-	-
		V6	60 kg ha <sup>-1</sup>	-	-

<sup>(a)</sup>: NPK, BC300 + NPK e BC500 + NPK; fontes <sup>(b)</sup>: sulfato de amônio marcado com  $^{15}\text{N}$ , <sup>(c)</sup>: superfosfato simples e <sup>(d)</sup>: cloreto de potássio.

Para a análise de  $^{15}\text{N}$  foram utilizados os grãos e as folhas do milho colhido na microparcela, quando a umidade dos grãos encontrava-se em aproximadamente 13%. As amostras foram colocadas em estufa e permaneceram lá por 72 horas com temperatura de 65 °C para a obtenção da matéria seca. As amostras secas foram moídas em moinho do tipo Willey e em liquidificador comum de alta potência, posteriormente passadas na peneira de 0,150 mm. A composição isotópica do  $^{15}\text{N}$  e o nitrogênio total foram determinados e analisados em espectrômetro de massa 20-20 acoplado a um analisador automático de N (ANCA-GSL da SerCon Co., Crewe, UK), no Laboratório de Isótopos Estáveis do Centro de Energia Nuclear na Agricultura da USP, Piracicaba, São Paulo.

O trabalho realizado por Coelho et al. (1991) evidenciou que o  $^{15}\text{N}$  apresenta uma mobilidade por igual na planta, mostrando que não há diferenças significativas nos teores de nitrogênio em diferentes partes do milho, como colmo, pendão e folhas, assim não há necessidade de analisar individualmente os diferentes órgãos, resultando economia financeira e de tempo. Por esse motivo, as folhas coletadas serão chamadas de palhada.



### 3.5. Nitrogênio derivado do fertilizante e do solo e a eficiência de recuperação do nitrogênio do fertilizante

O nitrogênio derivado do fertilizante mineral (NDFM) foi calculado conforme a equação abaixo:

$$NDFM (kg ha^{-1}) = \left( \frac{\% \text{ átomos de } ^{15}N \text{ em excesso na MS}}{\% \text{ átomos de } ^{15}N \text{ em excesso no fertilizante}} \right) \times N \text{ total na MS}$$

sendo *MS* a matéria seca dos grãos do milho e *N TOTAL* o nitrogênio total dos grãos do milho.

O nitrogênio derivado do solo (NDS) foi considerado como todo o nitrogênio absorvido pelo milho não advindo do fertilizante mineral marcado:

$$NDS (kg ha^{-1}) = (1 - NDFM) \times N \text{ total na MS}$$

A eficiência de recuperação do N-fertilizante (ERNF) pelo milho foi calculada a partir da seguinte expressão:

$$ERNF (\%) = \left( \frac{NDFM}{150 kg ha^{-1} \text{ de } N \text{ do fertilizante aplicado como adubo}} \right) \times 100$$

### 3.6. Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias de três repetições foram comparadas pelo teste LSD de Fisher a 5% de significância ( $p < 0,05$ ) utilizando-se o software XLSTAT.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Eficiência de recuperação de nitrogênio do fertilizante e o nitrogênio derivado do fertilizante e do solo

Tanto nos grãos quanto na palhada os tratamentos apresentaram o mesmo comportamento em relação à eficiência de recuperação de nitrogênio do fertilizante (ERNF). O efeito residual do biochar produzido a 500 °C elevou a ERNF comparado à aplicação exclusiva do NPK, cuja ERNF foi de 37,6% pelos grãos e 31,7% pela palhada (Tabela 4). O BC500+NPK apresentou ERNF de 46,1% e 38,1%, nos grãos e palhada, respectivamente. O BC300+NPK apresentou comportamento intermediário e não diferiu dos demais tratamentos ( $P>0,05$ ).

**Tabela 4.** Eficiência de recuperação do nitrogênio do fertilizante (ERNF) em grãos e palhada de milho cultivado em área sob efeito residual de biochar de lodo de esgoto.

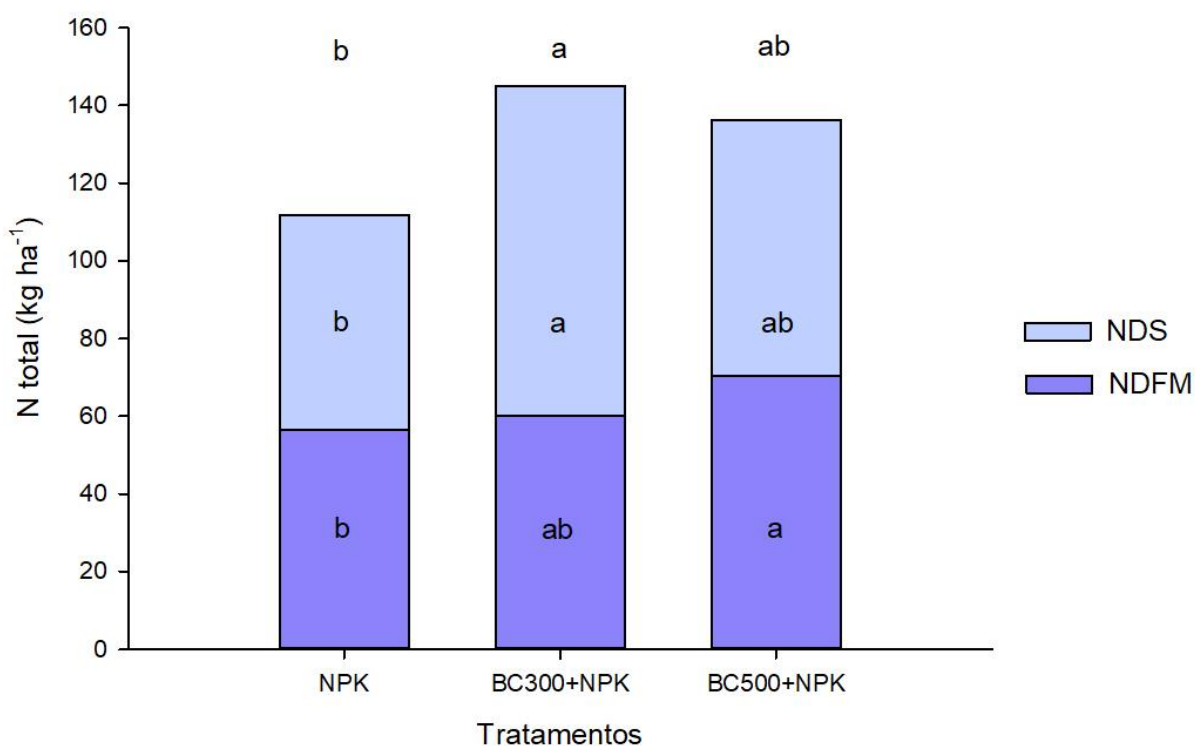
Tratamentos	ERNF (%)			
	Grãos		Palhada	
NPK	37,6	b	31,7	b
BC300+NPK	40,1	ab	34,1	ab
BC500+NPK	46,9	a	38,1	a

Médias seguidas por letras iguais não apresentam diferenças estatísticas de acordo com o teste LSD de Fisher ( $P<0,05$ ).

Vários estudos indicam que na cultura do milho, a eficiência de adubação nitrogenada é menor que 50% (COELHO et al., 1991; ALMEIDA, 2008; GAVA et al., 2010; GÜEREÑA et al., 2013; CHENG, 2018, DING et al., 2019), valor esse que varia conforme as condições edafoclimáticas da região, fonte e doses de N aplicadas (CHENG, 2018). Em áreas do Cerrado, Figueiredo et al. (2005) mostraram variação de ERNF em grãos de 26% a 34% em diferentes manejos do solo. Sob monocultivo, o milho apresentou ERNF de 29,5% a 45,8% para palhada e grãos, respectivamente (COSER et al., 2016).

Ainda são poucos os estudos sobre a influência do biochar na eficiência de adubação nitrogenada. Güereña et al. (2013) obtiveram uma eficiência de 20% usando apenas fertilização mineral e 39% com a aplicação 12 t/ha de biochar de palha de milho, justificando a maior retenção de N total devido às menores perdas gasosas e por erosão.

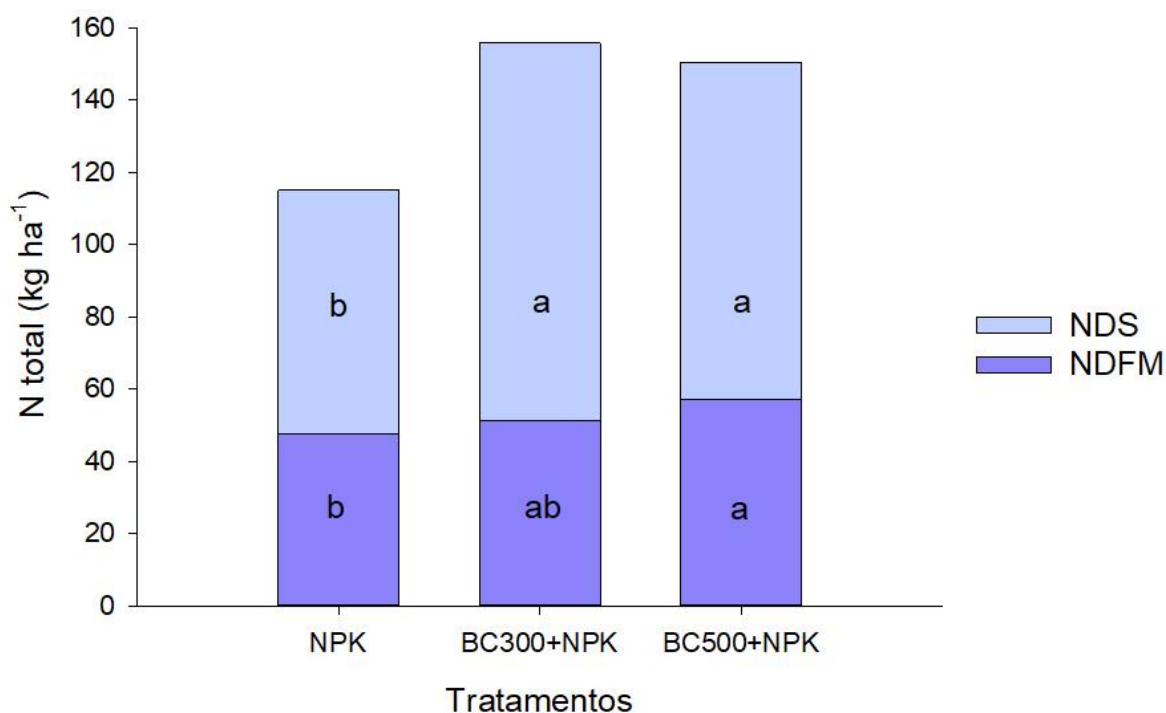
Em um trabalho mais recente buscando a eficiência de adubação nitrogenada a partir da técnica de N marcado, utilizando diferentes doses de biochar de palha de milho e diferentes taxas de aplicação de N, Sun et al. (2019) observaram que a maior recuperação de N foi de 29,4% ao combinar a proporção de 82,5 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante N com 112,5 t ha<sup>-1</sup> de biochar de palha de milho, porém ao aplicar 150 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante N e 337,5 t ha<sup>-1</sup> de biochar a taxa de recuperação cai para 14,7%, enfatizando que as perdas por lixiviação e volatilização aumentam progressivamente conforme a disponibilidade de N no solo.



**Figura 2.** Recuperação de nitrogênio total pelos grãos, composto pelo N derivado do fertilizante e do solo, aplicado na forma sulfato de amônio. NPK – adubação exclusiva de fertilizante mineral; BC300 + NPK – aplicação de adubação mineral NPK no solo sob efeito residual de biochar produzido a 300 °C; BC500 + NPK – aplicação de adubação mineral NPK no solo sob efeito residual de biochar produzido a 500 °C. Médias seguidas por letras iguais não apresentam diferenças estatísticas de acordo com o teste LSD de Fisher ( $P < 0,05$ ).

No tratamento BC500+NPK, os grãos e a palhada acumularam 14,00 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 2) e 9,51 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 3), respectivamente, a mais de NDFM do que no tratamento com uso exclusivo de NPK. Esses dados sugerem que essa massa não absorvida foi lixiviada e/ou transformada em gás, destacando, assim, o biochar como meio de retenção desse nutriente no solo, conforme constatado por diversos autores

(GLASER et al., 2002; LEHMANN e RONDON, 2006; STEINER et al., 2007; SOHI et al., 2009; SOHI et al., 2010; ALBUQUERQUE et al., 2013).



**Figura 3.** Recuperação de nitrogênio total pela palhada, composto pelo N derivado do fertilizante e do solo, aplicado na forma sulfato de amônio. NPK – adubação exclusiva de fertilizante mineral; BC300 + NPK – aplicação de adubação mineral NPK no solo sob efeito residual de biochar produzido a 300 °C; BC500 + NPK – aplicação de adubação mineral NPK no solo sob efeito residual de biochar produzido a 500 °C. Médias seguidas por letras iguais não apresentam diferenças estatísticas de acordo com o teste LSD de Fisher ( $P < 0,05$ ).

Na avaliação da absorção de N a partir do fertilizante, nota-se que dos 150 kg N ha<sup>-1</sup> aplicados foram absorvidos 56,4 kg ha<sup>-1</sup> e 47,6 kg N ha<sup>-1</sup> no tratamento NPK; 60,2 kg N ha<sup>-1</sup> e 51,2 kg N ha<sup>-1</sup> no BC300+NPK; e 70,4 kg N ha<sup>-1</sup> e 57,1 kg N ha<sup>-1</sup> no BC500+NPK pelos grãos e palhada, respectivamente (Figuras 2 e 3). As diferenças na absorção do NDFM foram significativas, sendo maiores no BC500+NPK comparado ao NPK tanto nos grãos quanto na palhada.

O solo foi o grande fornecedor de N para as plantas, principalmente nos tratamentos sob efeito residual de biochar. Para grãos e palhada, respectivamente, no tratamento NPK o NDS foi de 55,6 kg N ha<sup>-1</sup> e 67,5 kg N ha<sup>-1</sup>, no BC300 + NPK foi de 84,7 kg N ha<sup>-1</sup> e 104,56 kg N ha<sup>-1</sup>, e no BC500 + NPK 65,9 kg N ha<sup>-1</sup> e 93,43

kg N ha<sup>-1</sup> (Figuras 2 e 3). Não foram significativas as diferenças entre NPK e BC500 + NPK na absorção de N pelos grãos. Na palhada, as diferenças foram significativas entre NPK e os tratamentos com biochar, não diferindo entre BC300 e BC500.

Os resultados do presente trabalho demonstram que o biochar, mesmo sob efeito residual, aumenta o aproveitamento do N pelo milho. Esse efeito pode ser resultado dos benefícios que o biochar proporciona ao solo como aumento da CTC e da matéria orgânica, tendo como consequência o melhor uso do N (SOHI et al., 2009; LIU et al., SOHI et al., VAN ZWIETEN et al., 2010).

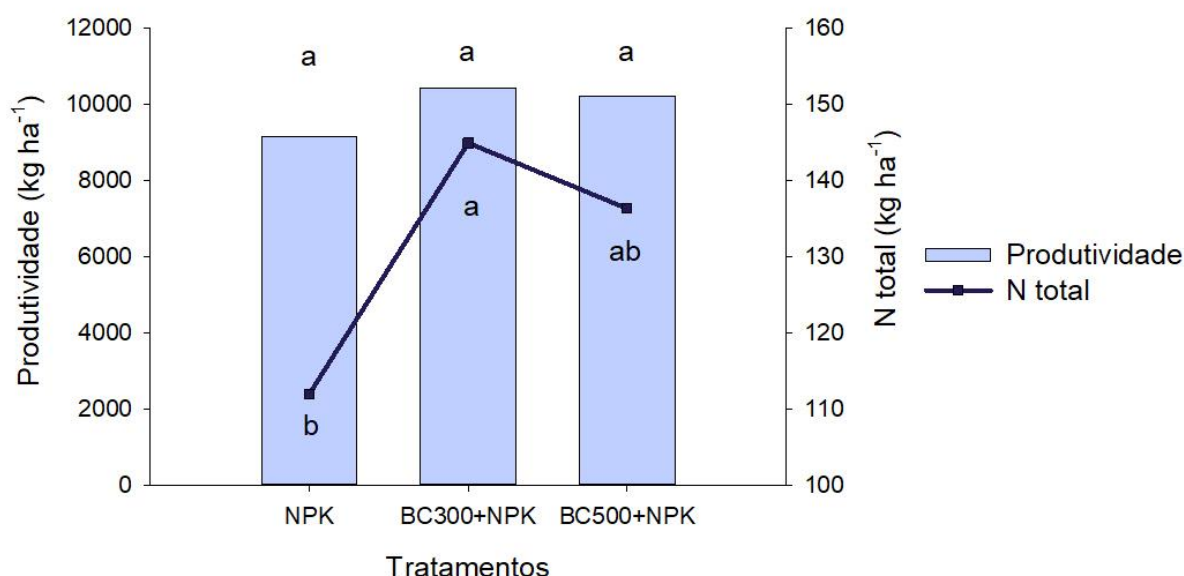
No presente estudo, juntamente com o fertilizante mineral, o N presente no solo foi fundamental para o adequado fornecimento de N para as plantas, justificando a importância do manejo de solo para aumento de microrganismos e de matéria orgânica (LEHMANN e RONDON, 2006; SOHI et al., 2009; CLOUGH e CONDRON, 2010; ALBUQUERQUE et al., 2013).

#### **4.2 Produtividade de grãos, massa seca e N total**

Apesar das diferenças obtidas no uso do N (ERNF, NDFM e NDS) com a aplicação de biochar, os tratamentos não promoveram diferenças na produtividade de grãos de milho (Figura 4). De forma similar, no trabalho de Güereña et al. (2013) também não foram obtidas diferenças nas produtividades de grãos. Apesar da ausência de diferença estatística, no presente estudo, o BC300 + NPK promoveu produção de quase 1300 kg ha<sup>-1</sup>, que representa incremento de 12,23 % a mais do que o NPK, valor este que se torna expressivo quando grandes áreas de terra são consideradas.

Na avaliação da palhada produzida pela planta foi obtido no tratamento NPK 5767,7 kg ha<sup>-1</sup>, no BC300 + NPK 7349,44 kg ha<sup>-1</sup>, e no BC500 + NPK 7164,33 kg ha<sup>-1</sup>. Portanto, os tratamentos BC300 + NPK e BC500 + NPK promoveram incrementos de 1581,7 kg ha<sup>-1</sup> e 1396,6 kg ha<sup>-1</sup> de palha em relação ao NPK, respectivamente. O BC300 + NPK promoveu maior produção de palhada de milho do que a aplicação exclusiva de NPK (Figura 5). Esse efeito residual do biochar (BC300 + NPK) sobre as palhadas de milho é um importante indicativo de que com o tempo, essa maior quantidade de palhada retornará ao solo e, sob plantio direto, se tornará uma

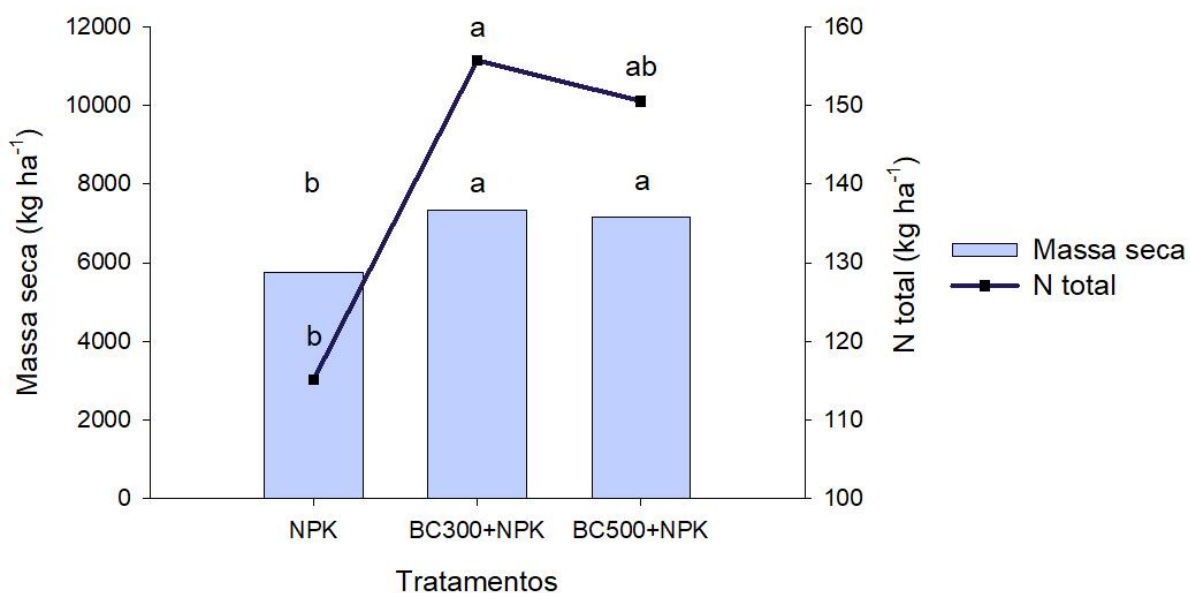
importante fonte de matéria orgânica do solo, que é a forma principal de armazenamento de N no solo.



**Figura 4.** Produtividade e nitrogênio total em grãos de milho. NPK – adubação exclusiva de fertilizante mineral; BC300 + NPK – aplicação de adubação mineral NPK no solo sob efeito residual de biochar produzido a 300 °C; BC500 + NPK – aplicação de adubação mineral NPK no solo sob efeito residual de biochar produzido a 500 °C. Médias seguidas por letras iguais em cada variável não apresentam diferença estatísticas de acordo com o teste LSD de Fisher ( $P < 0,05$ ).

Diversos trabalhos indicam o aumento da produtividade de culturas promovido pela aplicação de biochar. Na mesma área do presente estudo, quando da aplicação do biochar de LE, Faria et al. (2018) verificaram que a adição de biochar em campo por dois anos consecutivos foi capaz de substituir a adubação mineral para alcançar as mesmas produtividades do milho. Além disso, os trabalhos com biochar de casca de *Acacia mangium* (YAMATO et al., 2006), esterco bovino (UZOMA et al., 2011), palha de trigo (ZHANG et al., 2012) e madeira de salgueiro (*Salix spp.*) (AGEGNEHU et al., 2016) também demonstram aumentos de rendimento de grãos de milho.

O tratamento que mais absorveu N foi o BC300+NPK quando somados o NDFM e o NDS resultando em maior devolução de matéria seca (palhada) para o solo. Isso pode ser explicado pelo fato do biochar reter mais N no solo (GÜEREÑA et al., 2013), pelos teores de nitrato e amônio no BC300 serem quase três vezes maior do que no BC500 (FIGUEIREDO et al., 2018) gerando maior absorção de N.



**Figura 5.** Biomassa e nitrogênio total na palhada de milho. NPK – adubação exclusiva de fertilizante mineral; BC300 + NPK – aplicação de adubação mineral NPK no solo sob efeito residual de biochar produzido a 300 °C; BC500 + NPK – aplicação de adubação mineral NPK no solo sob efeito residual de biochar produzido a 500 °C. Médias seguidas por letras iguais em cada variável não apresentam diferença estatísticas de acordo com o teste LSD de Fisher ( $P < 0,05$ ).

## 5. CONCLUSÕES

Sob efeito residual do biochar produzido a 500 °C (BC500+NPK), o milho apresentou maior eficiência na recuperação do nitrogênio derivado do fertilizante mineral, tanto nos grãos quanto na palhada, do que a aplicação exclusiva de NPK. Também comparado a aplicação exclusiva de NPK, o biochar pirolisado a 300 °C foi mais eficiente no fornecimento de N derivado do solo e no acúmulo de N total (NDFM + NDS) nos grãos e na palhada de milho. Apesar do maior acúmulo de N, não houve diferenças de produtividade de grãos, mas o biochar proporcionou aumento significativo de palhada que representa uma importante forma de acúmulo de matéria orgânica no solo ao longo dos anos. Portanto, conclui-se que o biochar de lodo de esgoto apresenta efeito residual no solo proporcionando maior aproveitamento de N tanto do adubo nitrogenado quanto do solo, representando uma importante estratégia para reduzir o uso de fertilizantes minerais solúveis pela agricultura.



## 6. REFERÊNCIAS

AGEGNEHU, G.; BASS, A. M.; NELSON, P. N.; BIRD, M. I. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. **Science of the Total Environment**, v. 543, p. 295–306, 2016.

ALMEIDA, R. E. M. Balanço de  $^{15}\text{N}$  em sistemas de produção de milho para a adoção do plantio direto no oeste baiano. 85f. **Dissertação** (Mestrado em Fitotecnia), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; JANTALIA, C. P.; BODDEY, R. M.; Empego de isótopos estáveis para o estudo do carbono e do nitrogênio no sistema solo-planta. In: AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. (Ed.) **Processos biológicos no sistema solo-planta**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 343-368, 2005.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS – ANDA. **Relatório sobre o mercado de fertilizantes**. 2018.

ATKINSON, C. J.; FITZGERALD, J. D.; HIPPS, N. A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. **Plant and Soil**, v. 337, p. 1-18, 2010.

ALBUQUERQUE, J. A.; SALAZAR, P.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; DEL CAMPILLO, M. D. C.; GALLARDO, A.; VILLAR, R. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. **Agronomy Sustainable Development**, v. 33, p. 475–484, 2013.

BAI, S. H.; XU, C.; XU, Z.; BLUMFIELD, T. J.; ZHAO, H.; WALLACE, H.; REVERCHON, F.; ZWIETEN, L. V. Soil and foliar nutrient and nitrogen isotope composition at 5 years after poultry litter and Green waste biochar amendment in a macadamia orchard. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, p. 3803-3809, 2015.

BARRACLOUGH, D.  $^{15}\text{N}$  isotope dilution techniques to study soil nitrogen transformations and plant uptake. **Fertilizer Research**, v. 42, p. 185-192, 1995.

BARROW, C. J. Biochar: Potential for countering land degradation and for improving agriculture. **Applied Geography**, v. 34, p. 21–28, 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agropecuária Brasileira em Números**. Abril, 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, no 167, Seção 1, p. 141-146, 2006.

CARREIRA, J. A.; VIÑEGLA, B.; BLANES, M.; GARCÍA-RUIZ, R. Stable isotopes and changing paradigms on soil nitrogen and carbon biogeochemistry. **Ecosistemas**, v. 19, n. 3, p. 14-23, 2010.

CASE, S. D. C.; MCNAMAR, N. P.; REAY, D. S.; STOTT, A. W.; WHITAKER, J. Biochar suppresses N<sub>2</sub>O emissions while maintaining N availability in a sandy loam soil. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 81, p. 178-185, 2015

CHAN, K. Y.; VAN ZWIETEN, L.; MESZAROS, I.; DOWNIE, A.; JOSEPH, S. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. **Australian Journal of Soil Research**, v. 45, p. 629-634, 2007.

CHENG, N. C. Eficiência de uso da <sup>15</sup>N-ureia tratada com ácido bórico e sulfato de cobre pelo milho *Zea mays* L. 113 p. **Dissertação** (Mestrado), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

CLOUGH, T. J.; CONDRON, L. M. Biochar and the nitrogen cycle. **Journal of Environment Quality**, v. 39, p. 1218-1223, 2010.

COELHO, A. M.; FRANCA, G. E.; BAHIA, A. F. C.; GUEDES, G. A. A. Balanço de nitrogênio (<sup>15</sup>N) em um latossolo vermelho-escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n. 2, p.187-193, 1991.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 6 – Safra 2018/19 – Nono levantamento, Brasília, p. 1-50, 2019.

COSER, T. R.; RAMOS, M. L. G.; FIGUEIREDO, C. C.; URQUIAGA, S.; CARVALHO, A. M.; BARROS, F. V.; MENDONÇA, M. T. Nitrogen uptake efficiency of maize in monoculture and intercropped with *Brachiaria humidicola* and *Panicum maximum* in a dystrophi Red-yellow Latosol of the Brazilian Cerrado. **Crop & Pasture Science**, v. 67, p. 47-55, 2016.

DING, W.; LI, S.; HE, P.; HUANG, S. Contribution and fate of maize residue-<sup>15</sup>N and urea-<sup>15</sup>N as affected by fertilization regime. **Plos One**, v. 14, n. 1, p. 1-17, 2019.

DOURADO-NETO, D.; POWLSON, D.; ABU BAKAR, R.; BACCHI, O. O. S.; BASANTA, M. V.; CONG, P. T.; KEERTHISINGHE, G.; ISMAILI, M.; RAHMAN, S. M.; REICHARDT, K.; SAFWAT, M. S. A.; SANGAKKARA, R.; TIMM, L. C.; WANG, J. Y.; ZAGAL, E.; VAN KESSEL, C. Multiseason recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 1, p. 139-152, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

FARIA, W. M.; FIGUEIREDO, C. C.; COSER, T. R.; VALE, A. T.; SCHNEIDER, B. G. Is sewage sludge biochar capable of replacing inorganic fertilizers for corn production? Evidence from a two-year field experiment. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n.4, p. 505-519, 2018.

FENG, Z.; ZHU, L. Impact of biochar on soil N<sub>2</sub>O emissions under different biochar-carbon/fertilizer-nitrogen ratios at a constant moisture condition on a silt loam soil. **Science of the Total Environment**, v. 584-585, p. 776-782, 2017.

FIGUEIREDO, C. C.; CHAGAS, J. K. M.; DA SILVA, J.; PAZ-FERREIRO, J. Short-term effects of a sewage sludge biochar amendment on total and available heavy metal content of a tropical soil. **Geoderma**, v. 344, p. 31-39, 2019a.

FIGUEIREDO, C. C.; FARIA, W. M.; COSER, T. R.; DE PAULA, A. M.; DA SILVA, M.

R. S.; PAZ-FERREIRO, J. Sewage sludge biochar alters root colonization of mycorrhizal fungi in a soil cultivated with corn. **European Journal of Soil Biology**, v. 93, p. 103092, 2019b.

FIGUEIREDO, C. C.; LOPES, H.; COSER, T.; VALE, A.; BUSATO, J.; AGUIAR, N.; NOVOTNY, E.; CANELLAS, L. Influence of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of biochar from sewage sludge. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n. 6, p. 881–889, 2018.

FIGUEIREDO, C. C.; RESCK, D. V. S., GOMES, A. C.; URQUIAGA, S. Sistemas de manejo na absorção de nitrogênio pelo milho em um Latossolo Vermelho no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 3, p. 279-287, 2005.

FIORENTINO, N.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A.; LEHMANN, J.; ENDERS, A.; FAGNANO, M. CAYUELA, M. L. Interactive priming of soil N transformations from combining biochar and urea inputs: a  $^{15}\text{N}$  isotope tracer study. **Soil Biology and Biochemistry**, v.131, p. 166-175, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **World fertilizer trends and outlook to 2020**. Roma: Food and Agriculture Organization of United Nations, 2017.

GLASER, B.; BALASHOV, E.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. Black carbon n density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. **Organic Geochemistry**, v. 31, p. 669-678, 2000.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, p. 219-230, 2002.

GONZAGA, M. I. S.; MACKOWIAK, C.; DE ALMEIDA, A. Q.; DE CARVALHO JUNIOR, J. I. T.; ANDRADE, K. R. Positive and negative effects of biochar from coconut husks, orange bagasse and pine wood chips on maize (*Zea mays* L.) growth and nutrition. **Catena**, v. 162, p. 414-420, 2018.

GONZAGA, M I. S.; DE SOUZA, D. C. F.; DE ALMEIDA, A. Q.; MACKOWIAK, C.; LIMA, I. S.; SANTOS, J. C. J.; DE ANDRADE, R. S. Nitrogen and phosphorus uptake

efficiency in Indian mustard cultivated during three growth cycles in a copper contaminated soil treated with biochar. **Ciência Rural**, v. 49, n. 1, 2019.

GÜEREÑA, D.; LEHMANN, J.; HANLEY, K.; ENDERS, A.; HYLAND, C.; RIHA, S. Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize-based production system. **Plant and Soil**, v. 365, p. 239-254, 2013.

HAITI, K. M.; SWARUP, A.; MISHRA, B.; MANNA, M. C.; WANJARI, R. H.; MANDAL, K. G.; MISRA, A. K. Impact of long-term application of fertilizer, manure and lime under intensive cropping on physical properties and organic carbon content of an Alfisol. **Geoderma**, v. 148, p. 173-179, 2008.

HOOD-NOWOTNY, R.; WATZINGER, A.; WAWRA, A.; SOJA, G. The impact of biochar incorporation on inorganic nitrogen fertilizer plant uptake; an opportunity for carbon sequestration in temperate agriculture. **Geosciences**, v 8, 2018.

KASTNER, J. R.; MILLER, J.; DAS, K. C. Pyrolysis conditions and ozone oxidation effects on ammonia adsorption in biomass generated chars. **Journal of Hazardous Materials**, v. 164, p. 1420-1427, 2009.

LEHMANN, J.; DA SILVA JR, J. P.; RONDON, M., DA SILVA, C. M.; GREENWOOD, J.; NEHLS, T.; STEINER, C.; GLASER, B. Slash-and-char: a feasible alternative for soil fertility management in the Central Amazon?. **17th World Congresso f Soil Science**, 449pp, p. 1–12, 2002.

LEHMANN, J.; DA SILVA, J. P.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, v. 249, p. 343–357, 2003.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. London: Earthscan, 2009.

LEHMANN, J.; RONDON, M. Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics. **Biological approaches to sustainable soil systems**, p. 517–530, 2006.

LIU, E.; YAN, C.; MEI, X.; HE, W.; BING, S. H.; DING, L.; LIU, Q.; LIU, S.; FAN, T. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China. **Geoderma**, v.158, p. 173–180, 2010.

MIA, S.; SINGH, B.; DIJKSTRA, F. A. Aged biochar affects gross nitrogen mineralization and recovery: a  $^{15}\text{N}$  study in two contrasting soils. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 9, p. 1196-1206, 2017.

MIZUTA, K.; MATSUMOTO, T.; HATATE, Y.; NISHIHARA, K.; NAKANISHI, T. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal. **Bioresource Technology**, v. 95, p. 255–257, 2004.

O'NEILL, B.; GROSSMAN, J.; TSAI, M. T.; GOMES, J. E.; LEHMANN, J.; PETERSON, J.; NEVES, E.; THIES, J. E. Bacterial community composition in Brazilian anthrosols and adjacent soils characterized using culturing and molecular identification. **Microbial Ecology**, v. 58, p. 23-35, 2009.

SCHULZ, H.; GLASER, B. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v 175, p. 410-422, 2012.

SOHI, S.; LOPEZ-CAPEL, E.; KRULL, E.; BOL, R. Biochar, climate change and soil: A review to guide future research. **Csiro Land and Water Science Report 05/09**, 64pp, 2009.

SOHI, S. P.; KRULL, E.; LOPEZ-CAPEL, E.; BOL, R. A review of biochar and its use and function in soil. **Advances in Agronomy**, v. 105, p. 47-82, 2010.

SOUSA, A. A. T. C.; FIGUEIREDO, C. C. Sewage sludge biochar: Effects on soil fertility and growth of radish. **Biological Agriculture and Horticulture**, v. 32, n. 2, p. 127-138, 2016.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; DE MACEDO, J. L. V., BLUM, W. E.H.; ZECH, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral

fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant Soil**, v. 291, p. 275–290, 2007.

SUN, C. X.; HAO, L.; WANG, D.; LI, C.; ZHANG, C.; CHEN, X.; FU, J.; ZHANG, Y. L. Nitrogen utilization and metabolism in maize (*Zea mays* L.) plants under different rates of biochar addition and nitrogen input conditions. **Plant biology**, v. 19, p. 1-9, 2019.

TAGHIZADEH-TOOSI, A.; CLOUGH, T. J.; SHERLOCK, R. R.; CONDRON, L. M. Biochar adsorbed ammonia is bioavailable. **Plant and Soil**, v. 350, p. 57-69, 2012.

UZOMA K. C.; INOUE, M.; ANDRY, H.; FUJIMAKI, H.; ZAHOOR, A.; NISHIHARA, E. Effect of cow manure biochar on maize productivity under Sandy soil condition. **Soil Use and Management**, v. 27, p. 205-212, 2011.

VAN ZWIETEN, L.; KIMBER, S.; MORRIS, S.; CHAN, K. Y.; DOWNIE, A.; RUST, J.; JOSEPH, S.; COWIE, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and Soil**, v. 327, p. 235-246, 2010.

VIEIRA-MEGDA, M. X.; MARIANO, E.; LEITE, J. M.; FRANCO, H. C. J.; VITTI, A. C.; MEGDA, M. M.; KHAN, S. A.; MULVANEY, R. L.; TRIVELIN, P. C. O. Contribution of fertilizer nitrogen to the total nitrogen extracted by sugarcane under Brazilian field conditions. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 101, p. 241-257, 2015.

YAMATO, M.; OKIMORI, Y.; WIBOWO, I. F.; ANSHORI, S.; OGAWA, M. Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 52, n. 4, p. 489-495, 2006.

ZHANG, A.; LIU, Y.; PAN, G.; HUSSAIN, Q.; LI, L.; ZHENG, J.; ZHANG, X.; Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. **Plant and Soil**, v. 351, p. 263-275, 2012.